



УДК 621.3.045.54

**РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ФАЗЫ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ ПОДВОЗБУДИТЕЛЯ
СОВМЕЩЕННОГО
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО
БЕСЩЕТОЧНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ**

**CALCULATION OF THE INDUCTIVE RESISTANCE
OF THE PHASE OF THE ANKER WINDING OF THE
SUP-EXCITER OF THE COMBINED
MULTIFUNCTIONAL BRUSHLESS EXCITER**

Павлов Никита Олегович, магистрант каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: pavlov.nikita@mail.ru, Тел.: +7(919)369-00-10

Денисенко Виктор Иванович, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.i.denisenko@urfu.ru.

Nikita P. Pavlov, Master student, Department «Electrical machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: pavlov.nikita@mail.ru. Ph.: +7(919)369-00-10

Viktor D. Denisenko, Doctor Sc., Prof., Department «Electrical machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.i.denisenko@urfu.ru.

Аннотация: В данной статье рассмотрена картина магнитного поля рассеяния и взаимоиндукции якорной обмотки подвозбудителя для трёх типов конфигурации зубцово-пазового слоя. Рассчитано индуктивное сопротивление рассеяния и взаимоиндукции для всей фазы.

Abstract: In this paper, the picture of the magnetic field of scattering and mutual induction of the anker winding of the sup-exciter for the three types of configuration of the tooth-groove layer is considered.. The inductive resistance of scattering and mutual induction for the entire phase is calculated.

Ключевые слова: якорная обмотка подвозбудителя; индуктивное сопротивление.

Key words: the anker winding of the sup-exciter; the inductive resistance.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием малой энергетики растет потребность в разработке новых конструкций дизель-генераторных установок, способных работать в различных чрезвычайных ситуациях и в экстремальных климатических условиях, в том числе в пожароопасных условиях при ремонтах газо- и нефтепроводов, требующих высокую степень надежности энергоснабжения. Для работы в таких условиях целесообразно иметь закрытое исполнение генератора с совмещенным бесщеточным возбудителем (СМБВ).

Одним из возбудителей, разрабатываемых на кафедре электрических машин УрФУ, является возбудитель для дизельного генератора (ДГ) мощностью 60 кВт, 1500 об/мин и размещается внутри корпуса генератора. В данном возбудителе одним из определяющих функциональных элементов является совмещенный индукторный

подвозбудитель (ИПВ). Для упрощения технологии изготовления в конструкции СМБВ с большим числом полюсов целесообразно применить 4-х фазную якорную обмотку подвозбудителя (ЯОПВ) [1], которая размещается в зубцовом слое полюсного наконечника синхронного возбудителя. Технологичность конструкции ЯОПВ и мощность ИПВ, развиваемая как в номинальном, так и в форсировочном режиме, в значительной степени зависит от структуры построения зубцово-пазового слоя и схемы размещения полюсных катушечных групп ЯОПВ. Выбор структуры может быть выполнен на основе сравнительной оценки указанных мощностей при одинаковых условиях работы ИПВ. Как известно, максимальное значение мощности ИПВ определяется эквивалентным индуктивным сопротивлением схемы замещения подвозбудителя, существенную долю которого

составляет индуктивное сопротивление рассеяния ЯОПВ [2].

В связи с этим в данной статье проводится оценка индуктивного рассеяния ЯОПВ при трёх различных вариантах построения зубцово-пазового слоя.

На рис. 1 представлены варианты построения зубцово-пазового слоя и варианты размещения полюсных катушечных групп соседних фаз обмотки ИПВ, которые применяются в промышленных образцах СМБВ для генераторов средней и большой мощности (вариант рис. 1б) и в опытно-промышленном образце бигармонического возбудителя для мощных синхронных двигателей (рис. 1в). В возбудителях ДГ в условиях ограничения по наружному диаметру индуктора целесообразно применить 4-х фазную двухрядную обмотку (схема рис. 1а) [1]. Данная обмотка размещается в зубцово-пазовом слое, который образуется путем удаления из схемы рис. 1в крайних зубцов и зубцов, имеющих малую ширину.

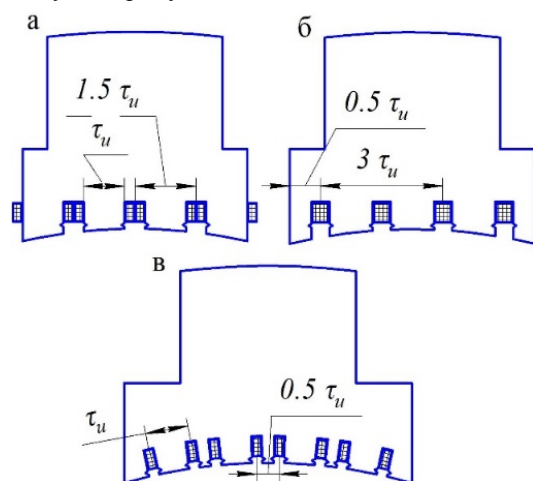


Рис. 1. Различные варианты построения зубцово-пазового слоя полюсного наконечника и способы построения обмотки ИПВ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью проведения эксперимента является определение индуктивного сопротивления фазы для трёх различных конфигураций зубцово-пазового слоя. Исследование магнитного поля проведено методом конечных элементов.

Плотность тока для всех трёх вариантов равна $j=220 \text{ А/м}^2$. Число витков в фазе $w=12$. Количество витков в одном пазу для варианта рис. 1б в 2 раза больше, чем для остальных вариантов. Обмотка является сосредоточенной $q=1$. Частота индукторной ЭДС $f=1000 \text{ Гц}$. Воздушный зазор $\delta=0,5$. Длина машины принимается $l=50 \text{ мм}$. Граничным условием принят магнитный поток на спинке индуктора равный 0 Вб/м .

В целях упрощения задачи катушки каждой фазы смоделированы таким образом, что в пазу располагается один эквивалентный виток вместо расчетного количества витков. Сечение эквивалентного витка принято таким что катушка создаёт такую же МДС как при реальном числе витков.

Расчет коэффициента пазовой проводимости рассеяния проводился численным методом, а также для схем рис. 1б и рис. 1в аналитическим методом, отдельно для каждого участка паза каждой конфигурации зубцово-пазового слоя. При расчете численным методом в каждом пазу были выделены 2 участка: 1) пространство, занимаемое катушкой исследуемой фазы с заданной плотностью тока 2) остальная часть паза, силовые линии поля в которой не проходят через области, занятые катушками исследуемой фазы.

Для определения проводимости численным методом для схем рис. 1а и рис. 1б был выполнен расчет магнитного поля пазового рассеяния ЯОПВ. Задача решена на пару полюсов. Так как в 4-х фазной ЯОПВ взаимоиндуктивная связь между соседними фазами по полю рассеяния практически отсутствует [5], расчет поля выполнен при питании только исследуемой фазы.

В соответствии с картиной магнитного поля, паз был разделен на трубки равного магнитного потока (области, ограниченные двумя соседними силовыми линиями). За основу взята формула для расчета коэффициентов проводимости пазового рассеяния:

$$\lambda_n = \int_0^{h_n} \left(\frac{S_x}{S_n} \right)^2 \frac{dx}{b_x} \quad (1)$$

где S_n и S_x – площади поперечного сечения паза, занятые проводниками обмотки; b_x , l_x – ширина и длина силовой линии соответственно.

Метод расчета проводимости аналогичен методу, описанному в [3].

Аналитическим методом коэффициент пазовой проводимости рассеяния определялся как среднее от суммы пазов, заполненных катушкой одной фазы; расчет велся по середине паза для схемы рис. 1б. по стандартной формуле [4]:

$$\lambda_n = \lambda_{n1} + \lambda_{n2} \quad (2)$$

$$\lambda_{n1} = \frac{h_n}{3b_n} \quad (3)$$

$$\lambda_{n2} = \frac{h_n}{b_n} \quad (4)$$

где λ_{n1} – пазовая проводимость первого участка; λ_{n2} – пазовая проводимость второго участка; h_2 –

глубина пространства, занимаемая катушкой; h_k – толщина клина, высота шлица, изоляция под клином; b_n – ширина паза.

В случае схемы рис. 1а аналитический метод определения коэффициента пазовой проводимости рассеяния не использовался, так как аналитические выражения для стороны катушки, находящейся в межполюсном пространстве, в технической литературе отсутствуют.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния и коэффициент магнитной проводимости рассеяния по коронкам зубцов вычислялись по стандартным выражениям [4].

Расчет индуктивного сопротивления рассеяния проводился по известному выражению [4]:

$$x_\sigma = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \frac{l}{pq} (\lambda_n + \lambda_l + \lambda_k) \quad (5)$$

Расчет индуктивного сопротивления взаимоиндукции так же проводился аналитическим и численным методами.

Аналитическим методом сопротивление взаимоиндукции рассчитывалось по формуле

$$x_m = 2\pi f w^2 \lambda_m \quad (6)$$

$$\lambda_m = \mu_0 \frac{y_k}{8\delta''} \quad (7)$$

где λ_m – коэффициент магнитной проводимости взаимоиндукции; y_k – шаг катушки; δ'' – эквивалентный воздушный зазор.

Численным методом сопротивление взаимоиндукции рассчитывалось по формуле (6), где λ_m определяется в соответствии с законом Ома для магнитной цепи:

$$\lambda_m = \frac{\Phi_m}{F} \quad (8)$$

где Φ_m – поток взаимоиндукции; F – намагничивающая сила.

Полное индуктивное сопротивление фазы обмотки рассчитывалось по формуле:

$$x_\phi = x_\sigma + x_m \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Картина магнитного поля рассеяния представлена на рисунках 2, 3 и 4 для схем рис. 1а, рис. 1б и рис. 1в соответственно.

Результаты расчета коэффициента пазовой проводимости рассеяния представлены в таблице 1. Результаты расчета индуктивных сопротивлений представлены в таблице 2.

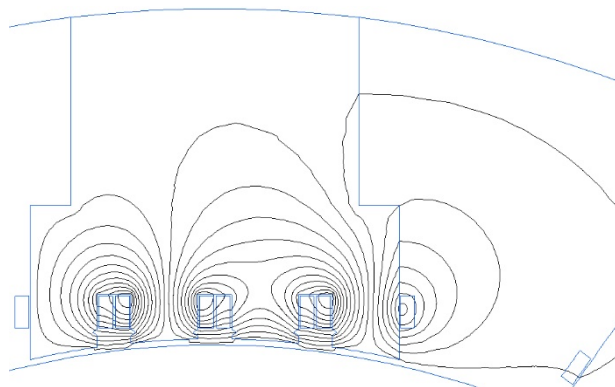


Рис. 2. Картина магнитного поля рассеяния.

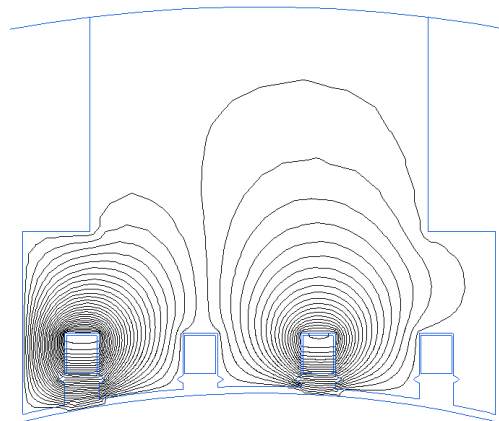


Рис. 3. Картина магнитного поля рассеяния.

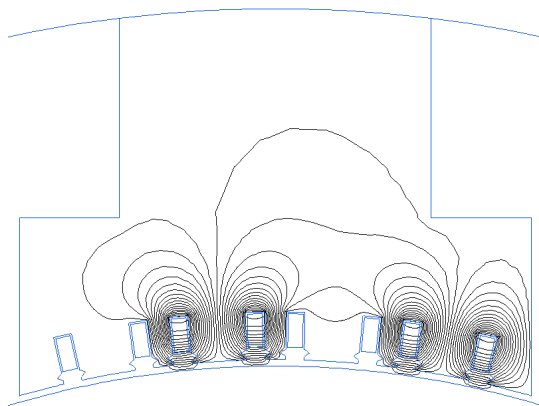


Рис. 4. Картина магнитного поля рассеяния.

Таблица 1
Результаты расчета коэффициента пазовой проводимости рассеяния

Схема	$\lambda_{п1}$		$\lambda_{п2}$	
	Аналит. метод	Числ. метод	Аналит. метод	Числ. метод
Рис. 1а	-	0,425	-	0,459
Рис. 1б	0,407	0,507	0,56	0,468
Рис. 1в	0,674	0,659	0,577	0,597

Исходя из расчетов в табл. 1 применение стандартных формул для расчета коэффициента пазовой проводимости рассеяния вносит большую погрешность для схемы рис. 1б. В связи с этим

необходимо ввести поправочный коэффициент (см. табл. 3) для каждого участка паза.

Таблица 2
Результаты расчета индуктивных сопротивлений.

		Рис. 1а	Рис. 1б	Рис. 1в
X_{σ}	Аналит. метод	-	0,039	0,040
	Числ. метод	0,039	0,0399	0,041
X_m	Аналит. метод	0,011	0,022	0,0079
	Числ. метод	0,011	0,024	0,0074
X_{ϕ}	Аналит. метод	-	0,061	0,0479
	Числ. метод	0,05	0,0639	0,0484

Выражение для расчета проводимости пазового рассеяния целесообразно записать в следующем виде:

$$\lambda_n = k_{y1} \frac{h_n}{3b_n} + k_{y2} \frac{h_n}{b_n} \quad (9)$$

где k_{y1} – поправочный коэффициент для участка 1;
 k_{y2} – поправочный коэффициент для участка 2.

Таблица 3.
Значение поправочного коэффициента.

Обозначение	Участок	Значение
k_{y1}	Участок 1	1,246
k_{y2}	Участок 2	0,836

Как показали исследования, применение стандартной формулы расчета пазовой проводимости рассеяния для схемы рис. 1в, которая использовалась в бигармоническом возбuditеле, не вносит существенной погрешности и её можно использовать для расчета коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния без введения поправочных коэффициентов. Расчет проводимости пазового рассеяния для схемы рис. 1б может быть выполнен только с введением корректирующих коэффициентов в стандартную формулу. Для определения результирующего индуктивного сопротивления рассеяния для схемы рис. 1а необходимо предварительно получить аналитическое выражение коэффициента пазовой проводимости рассеяния для стороны катушки, находящейся в межполюсном пространстве.

Исследования показали, что расчет индуктивного сопротивления взаимной индукции схемы замещения ИПВ может выполняться классическими методами. Однако полное индуктивное сопротивление схемы замещения ИПВ определяется главным образом индуктивным сопротивлением рассеяния, существенную долю

которого составляет лобовое рассеяние в связи с малой длиной сердечника магнитной системы СМБВ ДГ. В связи с этим требуется дополнительное исследование лобового рассеяния 4-х фазной двухрядной ЯОПВ, особенностью которой являются непересекающиеся лобовые части.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кычанов М. В. Особенности конструкции и перспективы дизель-генераторных установок закрытого исполнения с применением наноструктурированных изоляционных материалов / М. В. Кычанов, А. Н. Мойсейченко, В. И. Денисенко, А. Т. Пластун // Научные труды XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. В 3-х ч. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. Ч.1. С. 225-228.
2. Кычанов М. В. Оценка мощности подвозбудителя совмещенного многофункционального бесщеточного возбудителя / М. В. Кычанов, А. Н. Мойсейченко, В. И. Денисенко, А. Т. Пластун // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сборник докладов 4-ей Международной конференции в рамках выставки «Энергосбережение, отопление, вентиляция, водоснабжение» (Екатеринбург, 26-28 мая 2015 г.). - Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 175-178. ISBN 978-5-321-002284-9.
3. Кычанов М. В. К расчету проводимости пазового рассеяния двухрядной обмотки совмещенного многофункционального бесщеточного возбудителя / М. В. Кычанов, П. Л. Мяслицин, А. А. Леонов, В. И. Денисенко, // Научные труды XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. В 3-х ч. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. Ч.1. С. 212-215.
4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; Под ред. И. П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш.шк., 2002. – 757 с.
5. Денисенко В. И. Оценка влияния взаимной индукции фаз при расчете параметров рассеяния двухрядной обмотки индукторного подвозбудителя / В. И. Денисенко, М. В. Кычанов, П. Л. Мяслицин // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: Сборник докладов VII научно-практической конференции с международным участием в рамках выставки «Энергетика и электротехника. Автоматизированные системы и приборостроение. Светотехника», 11 – 13 ноября, 2008 г. Екатеринбург: Уральские выставки – 2000, 2008. – С. 134-138